

## 关于美国核能发展的五大认知误区



反核运动的真实群体曾经是“拥有高学历的进步派政策专家、律师、学者或记者，但他们却声称自己根本不反对核能”。时至今日，此前那些几乎毫不掩饰的核能反对势力已基本宣告失败。即便是美国自然资源保护委员会（NRDC）这一传统环保组织，目前也已转变立场，支持重启已停运的核电机组。然而，当前美国核能行业面临的最严峻挑战并非来自外部压力，而是源自行业内部。被称为“条件性亲核群体”阵营虽然主观上确实支持核能发展，但其所推崇的政策框架与技术路径，与导致核能行业经历长达一代人衰退与停滞的传统模式几乎没有本质区别。具体表现为继续推广缺乏

市场吸引力的反应堆技术，以及维持那些严重制约行业创新的监管制度。

五种常见的“条件性亲核群体”论调，分别为先进反应堆过于奇特且未经证实、规模经济意味着小型模块化反应堆永远不会比大型反应堆便宜、重大监管改革有害无利、浓缩燃料会显著增加核扩散风险和加倍重视公众参与程序是获得新建反应堆社会许可的关键。

这些论调彼此之间多有重叠，且每一种都含有一定的合理部分。但它们无一例外地将上世纪特定历史条件下形成的技术、经济和政治格局，误判为核能技术及其未来发展的内在本质。整体而言，这些论调所反映的并非对核能技术的客观务实判断，而是一种自我实现的预言。在当前这一前所未有的历史机遇，这种预言有可能将整个核能行业推向停滞乃至被淘汰的境地。

### **误区一：先进反应堆都是纸上反应堆**

纸上反应堆几乎总是具备以下基本特征：1. 结构简单；2. 体积小巧；3. 成本低廉；4. 重量轻；5. 建造速度极快；6. 用途极为灵活（如“通用型反应堆”）；7. 几乎无需研发；8. 主要采用“现成”组件；9. 处于研究阶段，目前尚未开工建设。

相反，实用型反应堆装置则具有以下特征：1. 目前正在建造中；2. 进度滞后；3. 看似微不足道的部件也需要大量研发工作；4. 腐蚀问题尤为突出；5. 造价极其昂贵；6. 由

于工程研发问题，建造周期漫长；7. 体积庞大；8. 重量大；9. 结构复杂。

如今，这段引言几乎总是被用来质疑小型先进反应堆，以此反衬大型轻水堆等成熟技术。但纸上反应堆的这些特征，并不像引用这段话的人想象的那样泾渭分明。事实上，美国目前正在建造的反应堆恰恰是小型先进反应堆：田纳西州的两台凯罗斯赫尔墨斯（Kairos Hermes）反应堆、怀俄明州的泰拉能源钠冷（TerraPower Natrium）反应堆，以及能源部在爱达荷国家实验室实施的反应堆试点计划中的约六座示范堆。其中数座已经进度滞后，而作为首台套反应堆，所有这些项目都将造价高昂。

首台套小型先进反应堆将毫无疑问地面临上述描述中的诸多问题。上世纪六七十年代，非轻水堆在政府实验室示范，极少数实现商业化时，就曾遭遇过完全相同的问题：钠冷却剂泄漏并起火、钢合金及其他材料在高中子通量快堆中发生脆化和腐蚀问题尤为突出。首台套商用反应堆的建造和运行成本高昂，且经常因维修和维护停运。这段历史构成了当今对先进反应堆诸多质疑的基础。

但讽刺的是，这些问题恰恰是实用型反应堆的特征，而非学术型反应堆的特征。上世纪六七十年代，美国正以具有竞争力的成本建造大量采用成熟技术、供应链完善的传统核电站，因此没有必要克服首台套和供应链挑战，将非轻水堆推向市场。但如今情况已截然不同。一系列制度和经济变革，

使得发达经济体很难再以具有竞争力的成本建造大型轻水堆。此外，充分依据显示，材料科学、计算技术及工程设计领域五十年来的长足进步，将帮助先进反应堆开发商攻克战后早期先进反应堆设计中存在的诸多技术瓶颈。

尽管特朗普政府曾发布行政命令，要求到 2030 年新建 10 座核反应堆，但过去五年间，所有关于下一座 AP1000 反应堆即将开工的高调报道均已化为泡影。由于无法说服国内各方承担项目风险，特朗普政府似乎正在考虑改弦易辙，放弃 AP1000 技术路线，转而默许采用韩国或日本的技术，并引入相关企业在美国启动大型反应堆建设项目。

据此，虽然 2024 年佐治亚州两座反应堆的建成投产使 AP1000 技术达到了商业化成熟阶段，但无论其支持者如何宣称，目前尚无充分证据表明后续 AP1000 项目能够实现建设周期缩短或建造成本降低。与之相反，除 2017 年南卡罗来纳州已终止的未完工 AP1000 项目外，预计 2030 年前美国境内不会有其他 AP1000 项目获得开工许可。

许多支持者还声称，下一批建造的 AP1000 成本可能比佐治亚州的两座核电站低 30%。但杜克能源和田纳西河谷管理局（TVA）近期的估算均显示，下一座 AP1000 的建造成本将高于佐治亚州的前两座。TVA 预计，一座 AP1000 的成本将与计划建造的四台 GE BWRX300 机组中的首台相当，而 GE BWRX300 后续建造的机组成本将大幅下降。在 TVA 的分析中，成本最低的是泰拉能源钠冷反应堆，预计其成本约为 AP1000 的三分之二。

除了沃格特勒（Vogtle）核电厂的两座机组外，全球唯一竣工的 AP1000 反应堆位于中国，其建造成本是西方难以复制的，且中国此后已对未来建造的设计进行了重大修改。曾计划建造四座 AP1000 为先进能源与情报园区供电的费米项目正在烂尾。自 2024 年沃格特勒反应堆竣工以来，时间每过去一天，AP1000 就越像一座纸面反应堆，而非实用型反应堆。

## 误区二：规模经济是核能领域的至上准则

上世纪六七十年代，轻水堆的单机容量从约 600 兆瓦的示范堆，逐步发展至 800 兆瓦的商用堆，最终突破 1 吉瓦大关成为大型反应堆。事实证明，规模效应对于轻水堆而言确实至关重要。在反应堆单机容量不断扩大的过程中，其单位兆瓦的建造与运行成本呈下降趋势，这一规律至少在 70 年代中期之前始终成立。然而在此之后，大宗商品与劳动力成本上涨、高利率环境以及过度监管等多重因素叠加，导致核能行业整体成本大幅攀升。究其根本，一座 600 兆瓦反应堆所需的基础设施、安保系统与运行人员数量，与一座 1200 兆瓦的大型反应堆几乎没有差别。

这一基本规律在很大程度上也适用于小型轻水堆设计。出于略有不同的原因，纽斯凯尔的 VOYGR 反应堆和 GE 的 BWRX300 反应堆，每兆瓦装机容量所需的混凝土和钢材都远多于 AP1000。小型轻水堆仍然需要较大的隔离区、人员充足的控制室，以及与大型轻水堆基本相同的基础设施。

但这一假设并不一定适用于许多其他反应堆类型。由于安全裕度更大，且最劣工况事故的发生概率和后果更低，许多小型先进设计可以大幅减少人员配置或实现远程操控。其隔离区通常仅为厂区围墙或围栏线。安保需求更低，且运动部件更少、冗余安全系统更简化，意味着维护、基础设施和人员需求大幅降低。

在首台套非轻水堆建成之前，无法确切知道这些反应堆的实际成本。与拥有成熟成本结构和大量数据可用于估算未来成本的轻水堆不同，非轻水堆的成本在结构和具体细节上都存在很大不确定性。爱达荷国家实验室牵头开展的一项全面文献综述与工程分析近期得出结论：尽管非轻水堆的成本估算存在高度不确定性，但现有最佳估算结果几乎无法支持“非轻水型小型模块化反应堆的成本将高于传统大型轻水堆”的说法。

诚然，在其他条件相同的情况下，大型反应堆的每兆瓦建造和运行成本通常低于小型反应堆，但其他条件几乎都不相同。无论是轻水堆还是其他类型的反应堆，在以美国和大多数其他发达经济体为主的自由化电力市场中，大型反应堆实际上已被证明几乎无法建造。短期和中期内的场址可用性，严重限制了大规模建造大型反应堆、从而重新掌握建造技术的机会。与此同时，更小的反应堆、更简单的建造方式以及大幅降低的单台成本，意味着规模经济、工艺创新、工厂化制造和简化供应链，对于小型非轻水堆技术而言，具有更大的降本潜力。

并非建议放弃 AP1000，或者规模经济永远不重要。AP1000 是一项卓越的技术。如能筹划在美国进行扩建建设，必将带来积极成效。但至少在目前的现实世界中，小型先进反应堆似乎正在占据上风。数十亿美元的私人投资已流入数十家下一代初创企业，超大规模云服务商、大型科技公司和工业用户的订单正在增长，真正的“实用型”反应堆实际上正在建造中。这表明传统轻水技术和大型反应堆，实际上可能并非核能的未来。

### 误区三：重大监管改革有害无利

2024 年国会辩论 ADVANCE 法案时许多昔日的核能支持者坚称，要求 NRC 更新其使命宣言以体现核能益处的关键条款，往好了说是“不务正业”，往坏了说会危及核安全。有些人公开表达了这种观点，另一些人则私下议论。然而如今，很难再找到任何核能支持者仍对这一变革持怀疑态度。一些人已公开改变立场，另一些人则在事后抢功。

这是因为，在 NRC 修订其使命宣言仅一年后，这一调整的影响已清晰可见。在 NRC 修订使命宣言之前的五年多时间里，国会要求其为一代反应堆现代化许可制度的行动一直拖延不决。而在修订后的一年里，NRC 不仅完成了国会 2019 年授权的第 53 部分许可框架制定，还根据第 14300 号行政命令修订了其全部监管法规。NRC 提前批准了泰拉能源的建造许可、纽斯凯尔的功率提升许可修正案以及凯罗斯赫尔墨斯 2 号反应堆的许可。

当然，仅凭新的使命宣言无法取得这些成果。特朗普政府更换并随后罢免了委员会前主席，发布了第 14300 号行政命令，并利用能源部和其他行政权力来源，迫使 NRC 大幅加快改革步伐。使命宣言是一场更广泛文化变革的一部分，这场变革已在整个机构内部乃至更远范围产生了连锁反应。

但法规制定和许可审批速度的显著变化，充分证明了该机构此前的许多监管实践实际上保守、武断且缺乏紧迫感。与此同时，对于 ADVANCE 法案通过前那些反对更新使命宣言的论点，人们如今已选择性遗忘，这一现象恰恰表明这些论点从一开始就缺乏足够依据。

然而，许多相同的各方如今正在提出几乎完全相同的论点，反对当前关于取消 ALARA 原则、废除或大幅限制 LNT 模型的使用和滥用、提高公众最大辐射剂量限值，以及通过能源部许可示范堆的提案。与使命宣言现代化时一样，这些“条件性亲核群体”倡导者声称这些改革毫无必要，因为传统和先进反应堆都已经能够满足旧标准。他们表示，提高监管阈值会增加事故风险，即便新规则 and 标准不会实质性增加公共健康风险，也会损害公众对 NRC 的信心。

和有关使命宣言现代化的相关论调类似，反对者未能阐明此类调整具体会通过何种实际途径引发不利影响。以公众辐射剂量限值由 100 毫雷姆上调至 500 毫雷姆为例，该调整看似会对公共健康造成严重影响，但事实上，两项限值均远低于会致使癌症发病率显著上升的辐射标准。与此同时，“由于当前和拟建的反应堆已经满足更严格的标准，因此改变这

些标准无关紧要”这一观点毫无依据地断言，在不同的监管制度下，受当前标准和监管规范影响的设计决策仍将保持不变。与关于小型先进反应堆面临的技术问题和规模经济的论点一样，这一论点牢牢锚定在当前的监管和技术现状中，无法告诉我们未来的开发商在不同政策下可能会采取什么行动。

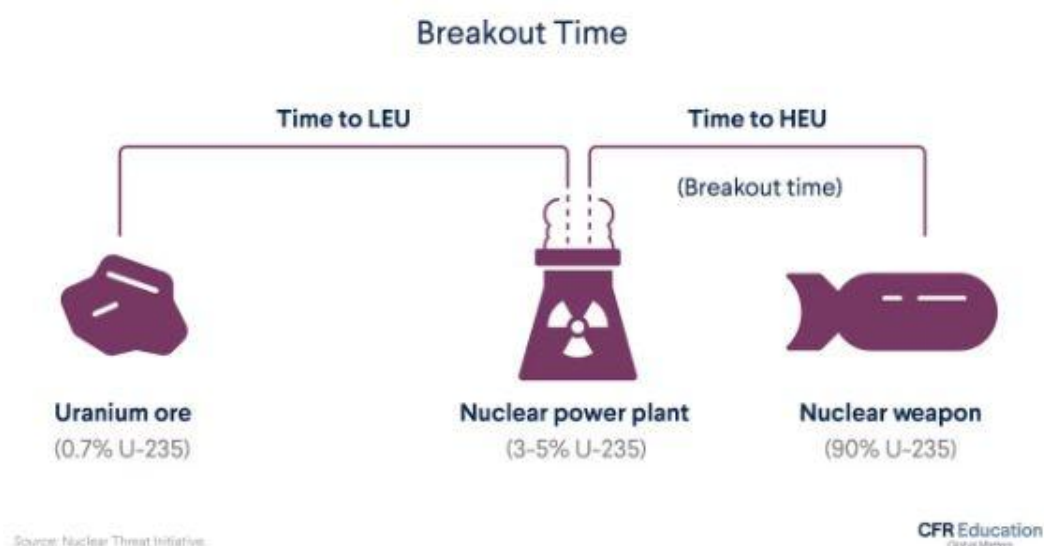
最后，关于“这些变革可能损害公众信心”的老旧观点，既误解了公众舆论的本质，也与任何形式的基于风险的监管根本不相容。毕竟，如果公众对辐射照射的恐惧既高度非理性又异常强烈，那么从定义上讲，所有基于风险的监管都会损害公众信心。相反，过去一年随着监管改革从空谈变为现实，我们清楚地看到，完全有可能以更灵活、更快捷的方式对核能进行许可和监管，同时不损害安全或引发公众抗议。

#### **误区四：先进反应堆与浓缩燃料会增加核扩散风险**

如果没有深入参与核政策和技术领域，可能会认为低浓铀 (LEU) 和高丰度低浓铀 (HALEU) 之间的区别晦涩难懂。但就不同燃料类型对不同反应堆的重要性而言，这一区别绝非无关紧要。大多数先进反应堆技术需要后者，其铀-235 丰度通常略低于 20%；而传统反应堆使用的低浓铀丰度通常为 4%-6%，已足够满足需求。

但就核扩散风险而言，这一区别确实晦涩难懂且基本无关紧要。无论是 4% 丰度的铀还是 20% 丰度的铀，都远不足以制造可裂变核武器。反对高丰度低浓铀的理由是，将 20%

丰度的铀进一步浓缩至铀  $^{235}$  含量超过 90% 的武器级铀，所需的额外浓缩工作量远少于从低浓铀开始。但决定能否制造武器级材料的关键，并非从低浓铀还是高丰度低浓铀开始，而是是否拥有生产低浓铀的浓缩能力。将铀矿石中 0.6% 的铀  $^{235}$  浓缩至 4% 或 6% 的过程和技术，与将低浓铀从 6% 浓缩至 18% 或 20%、再将高丰度低浓铀从 20% 浓缩至 90% 武器级铀所需的过程和技术完全相同，只需要大量的离心机来提高燃料中铀  $^{235}$  的浓度。一旦拥有足够的浓缩能力，能够将铀矿石中 0.6% 的铀  $^{235}$  浓缩至 6% 的低浓铀，就已经拥有了制造武器级燃料所需的全部浓缩能力和技术能力。高丰度低浓铀只是这条路径上的一步，而且并非特别重要的一步。只不过高丰度低浓铀开始，核突破时间会略短一些。但任何储备了大量低浓铀的行为体，都拥有足够的浓缩能力，能够在短时间内从低浓铀生产出武器级材料。



生产武器级铀的难点，并不在于获取铀矿石或离心机，而在于如何躲过国际社会的监视。制裁、技术限制

以及其他防止核扩散的抑制手段，使得核武器开发对除了最坚定的国家行为体之外的所有国家都失去了吸引力。那些决心开发核武器的国家，通常迟早会成功。但民用核能与铀浓缩能力的存在，与核武器开发之间并无显著关联。

然而，数十年来，不扩散界一直笃信高纯度低浓缩铀（HALEU）生产应当受到抑制，这一立场至今未变。如今，尽管几乎没有防扩散专家直接反对 HALEU 反应堆及其燃料，但基本逻辑依然是：浓缩能力越强、浓缩燃料越多，就越危险——尽管在许多情况下，低浓缩燃料和技术的获取速度更快，也更容易通往武器级材料。例如，轻水反应堆中使用的低浓缩铀（LEU）产生的乏燃料中钚含量，高于大多数先进反应堆中 HALEU 产生的钚含量。坎杜型（CANDU）反应堆使用天然铀燃料，无需任何浓缩过程，却能产生类似水平的钚。

尽管如此，核不扩散界的普遍偏好仍是大型轻水反应堆，采用一次通过式燃料循环，使用低浓缩铀（LEU）且不进行后处理。考虑到许多防扩散专家坚持为 HALEU 燃料生产及反应堆设定诸多限制与保障措施后，基于 HALEU 的技术几乎不可能具备可扩展性。

## 误区五：基于社区同意的选址是核设施社区接纳的关键

过去数十年间，美国核能领域的政治与政策发展，始终受尤卡山核废料处置库项目搁置问题的深远影响。内华达州参议员哈里·里德长期执掌参议院民主党领导层，使得该议题成为民主党在 NRC 与 DOE 的核心政策重心。业界普遍认为，民众对尤卡山项目的反对，以及纽约州肖勒姆核电厂、新罕布什尔州西布鲁克核电厂建设受阻的长期争端，充分印证了地方邻避抵制情绪，是全美核设施选址与建设屡屡受挫的主要诱因。

基于上述判断，多方核能业界人士均推崇协商共识式选址模式。既然症结在于相关核电及核废料设施常被强行落地于抵触社区，解决思路便为主动寻求自愿接纳的地区。最优路径是选址阶段充分吸纳公众参与，同时出台具备法律效力的专项社区利好政策，以此提升各地接纳相关设施的意愿。

但尽管理论上基于社区同意的选址并无不妥，大多数拟建核设施实际上已经获得了当地社区的广泛支持。就拟建的废料设施而言，其选址所在的社区均强烈支持这些项目。即便是尤卡山项目，也曾获得当地民众的大力支持。

相反，对这些设施的反对通常来自更远的地方。州政府官员、150 英里外的拉斯维加斯市以及全国性环保组织，是尤卡山项目的主要反对者。对得克萨斯州和新墨西哥州临时核废料储存设施的反对力量，构成也与此类似。

问题的根源并非不愿在自家社区接纳这些设施的当地邻避主义者，而是州政府官员。他们的动机往往是迎合人口

中心地区看不到这些设施直接益处的广大选民，并与那些通常与相关社区毫无关联的意识形态反对者结成同盟。近期此类提案，例如 NRC 拟设立的公众参与办公室，大概率会让情况变得更糟。这本质上是在资助那些在当地社区几乎没有实际存在的环境正义及类似激进组织，让他们出面阻挠核能项目，并要求当地人不会提出的社区福利。

事实上，许多社区正在竞相争取新建核设施。怀俄明州有四个城镇都参与了泰拉能源首座反应堆选址的竞选。DOE 提出的创新中心模式将长期废料储存、后处理、先进反应堆示范以及其他机会整合在一起，将这些中心定位为前沿能源技术的创新高地，这一模式已彻底扭转了局面。目前已有 28 个州表示有兴趣承办创新中心。结合地方与州级激励措施，并支持愿意接纳核设施的当地社区，远比将更多公众参与资源投入到那些从未反对过、且通常愿意接纳这些设施的社区，更有可能为核设施建立广泛的利益相关方支持。

## 面向 21 世纪的核能

上述所有论调并非必然错误。非轻水堆技术有可能像五十年前一样难以攻克。如果事实果真如此，大型反应堆很可能仍将是首选核能技术，为不同技术路径和创新留出空间的监管改革将变得不再完全必要，对高丰度低浓铀燃料的需求也将微乎其微，新建核基础设施的选址场景和应用场景的数量与多样性也将大幅简化。但这些昔日的条件与约束对核能未来的适用性，与它们所源自的历史一样，都具有高度的偶

然性。

且不论提出这些论调的人真诚与否，但如此多的核能倡导群体仍在打上个世纪的战争。对于许多核能业内人士而言，他们所熟悉的核能是其在行业内专业知识和地位的基础。对于许多既不深入了解技术也不了解其历史的通才而言，“条件性亲核群体”的立场是一种表明自己是严肃人士、而非狂热“核能迷”的方式。而对于许多中左翼核能支持者而言，“条件性亲核群体”有助于解决他们的认知失调。一方面他们对特朗普持负面看法，另一方面现实是，特朗普政府在加速核能创新、监管改革和商业化方面，远比拜登时代的民主党人更有成效。

当前，电力需求增长、人工智能经济、全球能源供应冲击、气候变化以及公众对核能看法的巨大转变，共同创造了自核时代开启以来前所未有的发展机遇。在这样一个时刻，试图将核能的未来限定为其 20 世纪历史的后工业仿制品，将产生实实在在的政策后果。

例如，为了说服公用事业公司和州监管机构批准新建大型反应堆，目前有提案要求设立联邦成本超支保险，但这一举措在催生大型轻水堆复兴的同时，也同样有可能造成成本超支。再如，面对来自各方“条件性亲核群体”阵营的批评，NRC 的监管改革努力未能为反应堆安全建立清晰、统一的数值标准。与此同时，在 NRC 着手全面修订其全部监管法规之际，大多数核能倡导群体未能实质性参与其中。DOE 的许可审批障碍和态度摇摆，导致国会授权建立的高丰度低浓铀

燃料库迟迟未能落地。尽管气候和清洁能源慈善机构资助了大量关于基于同意选址的学术讨论，但对州级核能倡导者的支持却寥寥无几。而正是这些人，才可能真正出现在当地会议上，支持拟建的核能项目。

不可否认，沿用过往成熟策略具备一定合理性，但固有思维模式已难以适配当下核能发展。过去五十年间，支撑行业发展的固有理念、准则、体制、运作模式与技术体系，是造成行业走向衰退的主要原因。正因如此，近十五年来重塑美国核能政治与政策格局的民间亲核力量，理应由敢于打破固有规则与既定观念的外部群体主导。然而该力量逐步发展壮大后，却屡屡受传统核能行业权威与固有思维束缚。核能行业若想迎来全新发展前景，必须探索全新发展路径。

对外交流合作部 张希延 供稿

摘自美国突破研究所

文章内容不代表本公众号观点